

УДК 621.382

## КАЛИБРОВКА СХЕМ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО СЛОЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Е. В. БАЛАШОВ, А. С. КОРОТКОВ, И. А. РУМЯНЦЕВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29*

**Аннотация.** Ключевыми элементами фазированных антенных решеток являются схемы управления амплитудно-фазовым распределением — аттенюатор и фазовращатель. Разброс технологических параметров приводит к отклонению характеристик интегральных схем от номинальных значений, что требует применения методик, компенсирующих данный эффект. В данной работе рассмотрены способы построения и методики калибровки схем на основе векторного сложения сигналов, позволяющие изменять как амплитуду, так и фазу входного высокочастотного сигнала. Предложена методика калибровки на основе интерполирования измеренных зависимостей модуля и фазы коэффициента передачи от управляющих напряжений. Применение данной методики для калибровки векторного фазовращателя с диапазоном рабочих частот 2,8–3,2 ГГц, изготовленного по 0,18 мкм КМОП-технологии, позволило обеспечить среднеквадратичное отклонение фазовой ошибки не более 0,9°. При этом количество требуемых измерений было снижено более чем в 20 раз по сравнению с известным подходом на основе измерений всех амплитудно-фазовых состояний.

**Ключевые слова:** векторный фазовращатель; калибровка; векторный модулятор; КМОП; LabVIEW

### ВВЕДЕНИЕ

Фазированные антенные решетки (ФАР) широко применяются в современных системах широкополосной связи и радиолокации. При увеличении рабочих частот в связи с особенностями распространения электромагнитных волн проблема формирования направленной передачи данных становится критически важной [1]. Ключевыми элементами приемопередатчика ФАР, формирующими амплитудно-фазовое распределение поля, являются фазовращатель и аттенюатор. Известны различные типы фазовращателей [2]: отражательные, на отрезках искусственных длинных линий с переменными параметрами, коммутируемые, векторные (т.е. на основе векторного сложения сигналов).

На сегодняшний день широкое распространение получили коммутируемые фазовращатели, которые представляют последовательное включение нескольких секций на основе ФНЧ и ФВЧ звеньев с различными фазовыми сдвигами. Требуемый фазовый сдвиг обеспечивается включением определенной комбинации звеньев. При этом управление осуществляется цифровым сигналом. Реализация коммутируемых фазовращателей осуществляется, как правило, на основе GaAs технологии. Основными недостатками данных фазовращателей являются высокая себестоимость, значительные вносимые потери, большие амплитудная и фазовая ошибки, вызванные разбросом технологических параметров при изготовлении кристаллов интегральных схем. Поскольку функцией фазовращателей является измене-

DOI: [10.20535/S002134701811002X](https://doi.org/10.20535/S002134701811002X)

© Е. В. Балашов, А. С. Коротков, И. А. Румянцев, 2018

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gustafson, C.; Tufvesson, F. "Characterization of 60 GHz shadowing by human bodies and simple phantoms," *Proc. of 6th European Conf. on Antennas and Propagation*, 26–30 Mar. 2012, Prague, Czech Republic. IEEE, 2012, p. 473–477. DOI: [10.1109/EuCAP.2012.6206265](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206265).
2. Ellinger, F.; Mayer, U.; Wickert, M.; Joram, N.; Wagner, J.; Eickhoff, R.; Santamaria, I.; Scheytt, C.; Kraemer, R. "Integrated adjustable phase shifters," *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 11, No. 6, p. 97–108, Oct. 2010. DOI: [10.1109/MMM.2010.937730](https://doi.org/10.1109/MMM.2010.937730).
3. Balashov, E. V.; Romyancev, I. A. "A fully integrated 6-bit vector-sum phase shifter in 0.18  $\mu$ m CMOS," *Proc. of Int. Siberian Conf. on Control and Communications*, 21–23 May 2015, Omsk, Russia. IEEE, 2015, p. 1–5. DOI: [10.1109/SIBCON.2015.7146991](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7146991).
4. Huang, Y.-Y.; Jeon, H.; Yoon, Y.; Woo, W.; Lee, C.-H.; Kenney, J. S. "An ultra-compact, linearly-controlled variable phase shifter designed with a novel RC poly-phase filter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 60, No. 2, p. 301–310, Feb. 2012. DOI: [10.1109/TMTT.2011.2177856](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2177856).
5. Asoodeh, A.; Atarodi, M. "A full 360° vector-sum phase shifter with very low RMS phase error over a wide bandwidth," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 60, No. 6, p. 1626–1634, June 2012. DOI: [10.1109/TMTT.2012.2189227](https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2189227).
6. Мухин, И.И.; Репин, В.В. "Проектирование полупроводниковых БИС активных фазовращателей с использованием SiGe-БиКМОП-технологии," *Известия вузов. Электроника*, № 4, С. 54–59, 2012. URI: [http://ivuz-e.ru/issues/96-2012/proektirovanie\\_poluprovodnikovyx\\_bis\\_aktivnykh\\_fazovrashchateley\\_s\\_ispolzovaniem\\_sige\\_bikmop\\_tekhnol/](http://ivuz-e.ru/issues/96-2012/proektirovanie_poluprovodnikovyx_bis_aktivnykh_fazovrashchateley_s_ispolzovaniem_sige_bikmop_tekhnol/).
7. Erkens, H.; Wunderlich, R.; Heinen, S. "A novel SiGe RFIC approach towards low-cost S-band transmit/receive modules," *Proc. of IEEE Radar Conf.*, 4–8 May 2009, Pasadena, CA, USA. IEEE, 2009, p. 1–4. DOI: [10.1109/RADAR.2009.4976951](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4976951).
8. Balashov, E. V.; Korotkov, A. S.; Romyancev, I. A. "An unbalanced transformerless vector-sum phase shifter in 0.18  $\mu$ m CMOS," *Selected Articles of VII All-Russia Science & Technology Conference: Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2017, Part III, Moscow, IPPM RAS. P. 2–5. DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30047518>.
9. Joram, N.; Mayer, U.; Eickhoff, R.; Ellinger, F. "Fully integrated active CMOS vector modulator for 802.11a compliant diversity transceivers," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems*, 9–11 Nov. 2009, Tel Aviv, Israel. IEEE, 2010, p. 1–4. DOI: [10.1109/COMCAS.2009.5386002](https://doi.org/10.1109/COMCAS.2009.5386002).
10. Yan, T.-C.; Lin, W.-Z.; Kuo, C.-N. "A 0.75–2.67 GHz 5-bit vector-sum phase shifter," *Proc. of European Microwave Integrated Circuit Conf.*, 6–8 Oct. 2013, Nuremberg, Germany. IEEE, 2013, p. 196–199. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6687819>.
11. Cetindogan, B.; Ozeren, E.; Ustundag, B.; Kaynak, M.; Gurbuz, Y. "A 6 bit vector-sum phase shifter with a decoder based control circuit for X-band phased-arrays," *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 26, No. 1, p. 64–66, Jan. 2016. DOI: [10.1109/LMWC.2015.2505618](https://doi.org/10.1109/LMWC.2015.2505618).
12. Wagner, J.; Joram, N.; Wolf, R.; Ellinger, F. "Broadband inductorless vector modulator IC for localisation and communication systems," *Electronics Lett.*, Vol. 51, No. 10, p. 767–769, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1049/el.2015.0343>.
13. Ellinger, F.; Lott, U.; Bachtold, W. "An antenna diversity MMIC vector modulator for HIPERLAN with low power consumption and calibration capability," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 49, No. 5, p. 964–969, May 2001. DOI: [10.1109/22.920155](https://doi.org/10.1109/22.920155).
14. Wu, P.-S.; Chang, H.-Y.; Tsai, M.-D.; Huang, T.-W.; Wang, H. "New miniature 15–20-GHz continuous-phase/amplitude control MMICs using 0.18- $\mu$ m CMOS technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 1, p. 10–19, Jan. 2006. DOI: [10.1109/TMTT.2005.860896](https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.860896).

15. Jung, W.-J.; Hong, N.-P.; Nam, K.-H.; Lee, J.-H.; Kim, T.-J.; Jang, P.; Park, J.-S. "An improved vector modulator using Q-factor calibration for 5-6GHz beamforming receiver," *Proc. of Int. Conf. on Electronics, Information, and Communication*, 24-27 Jan 2018, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2018, p. 1-5. DOI: [10.23919/ELINFOCOM.2018.8330709](https://doi.org/10.23919/ELINFOCOM.2018.8330709).

16. Wang, C.; Miao, J. "Implementation and broadband calibration of a multichannel vector modulator module," *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 11, No. 2, p. 155-163, 2017. DOI: [10.1049/iet-smt.2016.0072](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0072).

Поступила в редакцию 05.07.2018

После доработки 13.11.2018

Принята к публикации 30.11.2018